

原稿種別 (←編集部で記入します)

越流対策型布製型枠工法による粘り強い河川堤防の越水実験

布製型枠協会 梶澤 竜生

1. はじめに

近年の気候変動により洪水被害が頻発化・激甚化しており、それに対し被害を防止・軽減することが求められている。令和元年台風第 19 号による洪水では、全国で 142 箇所の河川堤防が決壊し、そのうち 122 箇所（約 86%）は越水が決壊の主要因であるとされている¹⁾。このような背景から、国土交通省を主体とした技術検討会において、「粘り強い河川堤防」の整備を推進する基本方針が示されている。令和 4 年 5 月の技術検討会では越水した場合であっても「粘り強い河川堤防」に求められる性能について、「越流水深 30cm の外力に対して、越流時間 3 時間の間は越水に対する性能を維持する構造とすること」とする技術開発上の目安が設定されている。「粘り強い河川堤防」は越水しても決壊しない堤防ではなく、施設の能力を超える洪水に対し、避難のための時間を確保する等、被害を最小限にするため、越水しても決壊しにくく、堤防が決壊するまでの時間を少しでも長くするなどの減災効果の発揮を目的としている²⁾。

本論文では表面被覆型である越流対策型布製型枠（モルタル被覆タイプと植生被覆タイプの 2 ケース）を裏法面の被覆工として用い、実物大の大型模型堤防で越水実験を行った結果による、被覆工の変形・変位、堤体土の引張破壊応力と堤体の侵食状況（侵食防止効果）を報告する。

2. 工法の概要

越流対策型布製型枠工法とは、河川堤防裏法面の越流時において、粘り強い構造を長期的に確保するために、表面被覆型として透水性を有する高強度合成繊維の二重織布製型枠に 1:2 モルタルを注入した板状体にて被覆する工法である。写真-1 に参考写真を示す。

特徴としては布製型枠自体が透水性を有するため、注入モルタルの余剰水が絞り出され、硬化時間を早め、耐久性のある硬化体となる。現地に適したサイズにて布製型枠を製作できるので、一度に広範囲の施工が可能である。

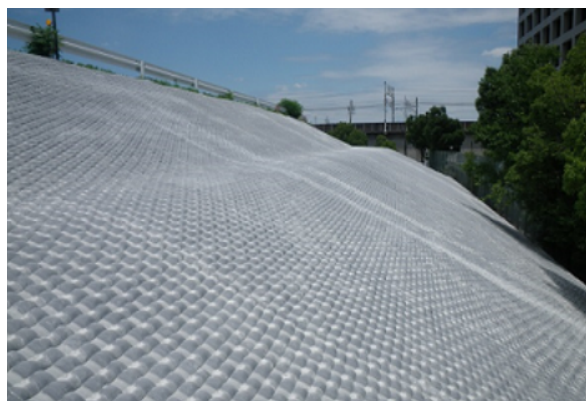


写真-1 越流対策型布製型枠 参考写真

3. 実験概要

(1) 越流対策型布製型枠（被覆工）のタイプ

a) モルタル被覆タイプ（以下、ケース 1）

被覆工は法面部に遮水型のノンフィルター部（平均厚み 10cm）と法尻水平部にドレーン工からの浸透水を排水するため透水型のフィルター部（平均厚み 10cm）を用い、法尻部にドレーン工と

して長繊維不織布（ $t=3\text{mm}$ ）にて包んだ、耐久性・耐腐植性に優れ、且つさびない特徴を持つ強化繊維カゴ（高さ 0.5m）を使用し、中詰材として割栗石（粒径 150~230mm）を使用した表面被覆型のタイプである。写真-2、3 に各部位の写真を示す。

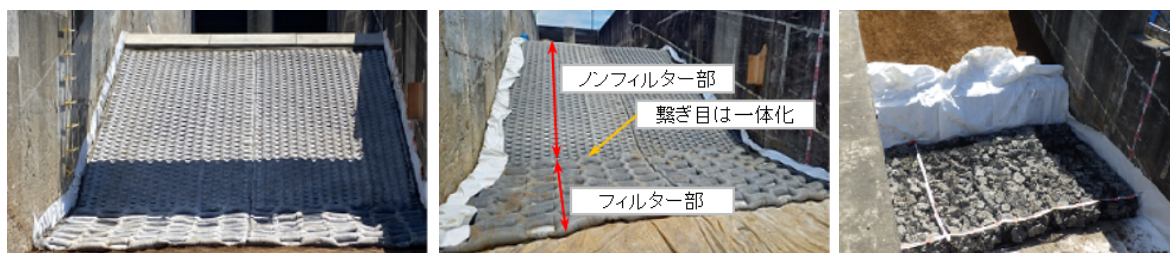


写真-2 モルタル被覆タイプ



写真-3 モルタル被覆タイプの各部位写真

b) 植生被覆タイプ（以下、ケース 2）

被覆工は法面部に植生型のメッシュ部（平均厚み 10cm）と法尻水平部に透水型のフィルター部（平均厚み 10cm）、同法面のメッシュ部背面に吸出し防止目的と堤体への浸水を防ぐための三層一体型透気防水シート（ $t=5\text{mm}$ ）を用い、ドレーン工はケース 1 同様を使用した多自然表面植生被覆型のタイプである。写真-4、5 に各部位の写真を示す。



写真-4 植生被覆タイプ

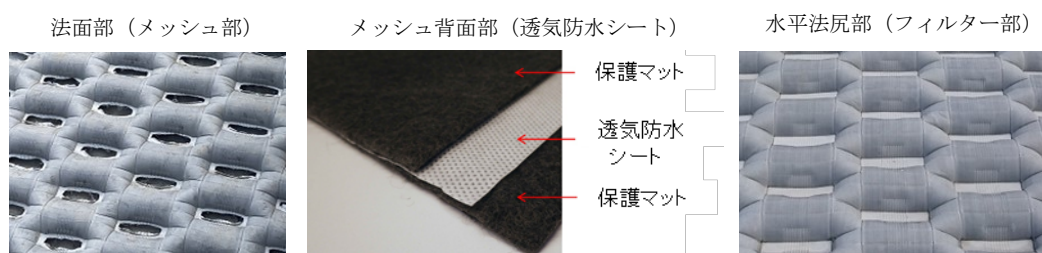


写真-5 植生被覆タイプの各部位写真

(2) 堤体構造

本実験は国土技術政策総合研究所の大規模模型実験水路（中）実験施設にて、ケース 1、2 の 2 タイプを行った。実験断面を図-1、2 に示す。堤体模型はケース 1、2 共に堤防高 2.5m、天端幅 3.0m、表・裏法面 1 : 2.0 勾配、基礎地盤高さ 1.0m、ドレーン工厚み 0.5m の模型堤防を構築した。堤体模型に使用した盛土材料の物性値を表-1、粒径加積曲線を図-3、締固め曲線を図-4 に示す。使用した土砂は、細粒分含有率 $FC=20.4\%$ の砂質土である。締固めについては、最適含水比 $w_{opt}=22.5\%$ （若干湿潤側）に調整し、締固め度 $D_c \geq 90\%$ 程度で管理した。天端保護工はアスファルト表層 5cm 厚、砕石路盤層 15cm 厚とした。

表法面側の盛土材料は表法面側の堤体内への浸透の影響は考慮しないことより、セメント改良土を利用することとし、表法面側に遮水シートを敷設した。セメント改良土の配合は、普通ポルトランドセメントを用い、セメント配合量 150kg/m^3 程度で改良を行った。

被覆工はケース 1、2 共にポンプ車にて 1 : 2 モルタル（水セメント比 $W/C : 60\%$ ）を越流対策型布製型枠へ圧入し、突合部は写真-6 のように実験水路幅センターになるように設置した。ケース 2 の透気防水シートは越流対策型布製型枠の突合部と重ならないように位置を変え、写真-7 のように 2 カ所の接合部を設けた。モルタルはフロー試験を行い P ロートにより、18 秒 $\pm$ 3 にて管理を行った。

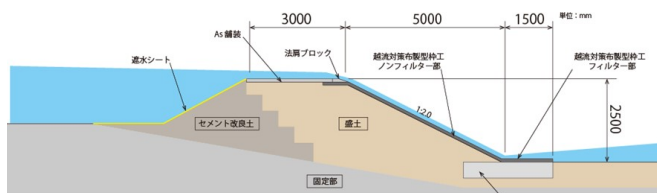


図-1 ケース 1 実験断面

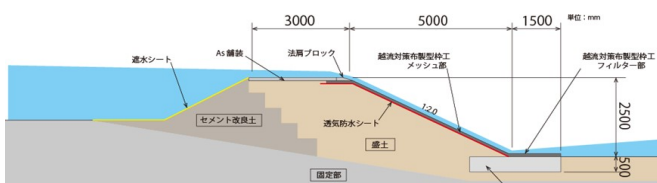


図-2 ケース 2 実験断面

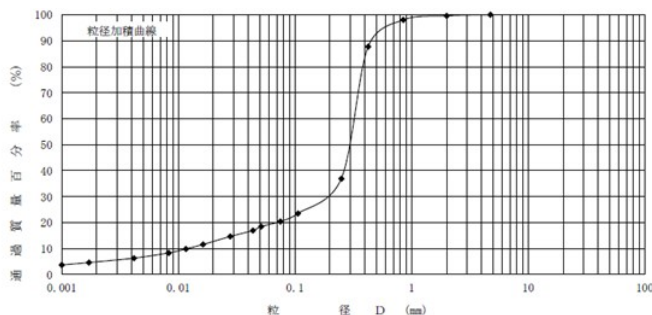


図-3 堤体盛土材の粒径加積曲線

表-1 盛土材の物性値

土粒子の密度 ρ_s (g/cm ³)	2.834
礫分 (%)	0.4
砂分 (%)	79.2
細粒分 (%)	20.4
最大粒径 (mm)	4.75
D50 (mm)	0.297
均等係数 U_c	27.50
曲率係数 U_c'	9.31
最大乾燥密度 ρ_{dmax} (g/cm ³)	1.605
最適含水比 w_{opt} (%)	22.5

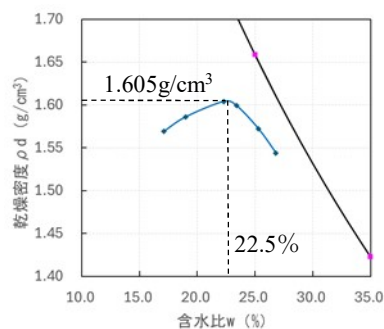


図-4 盛土材の締固め曲線

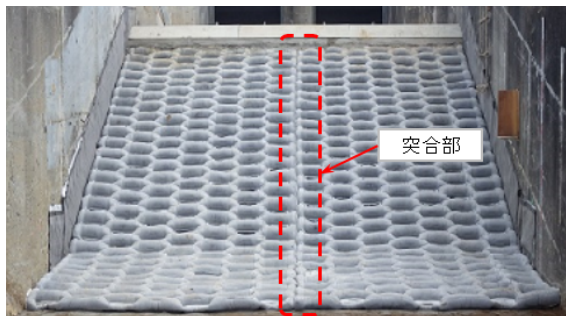


写真-6 越流対策型布製型枠の突合部



写真-7 透気防水シート接合部

4. 実験方法

ケース 1、2 共に堤体模型を構築後、越流水深 30cm まで一定速度で水位を上昇させた後に水深を一定に保ち、1 時間経過後に一旦越水を止め、被覆工の状態と基礎地盤およびドレーン工境界部の侵食状況を確認し、図-5 のように越水実験前と後で天端保護工、法肩ブロック、裏法保護工（法肩・法中央・法尻）、裏法尻保護工、基礎地盤の各部位の変位についてレベル測量を行った。また、図-6 の位置にて実験中に流速および水深を各部位で計測を行った。流速は電磁流速計を用いて測定し、計測器を水中に浸漬させて直接的に計測を行った。この手順を 3 回繰り返し、累計 3 時間以上の越水実験を実施した。越水実験後では築堤の引張破壊応力、および被覆工を撤去し、堤体の変位と侵食状況を確認した。実験状況写真を写真-8～写真-13 に示す。

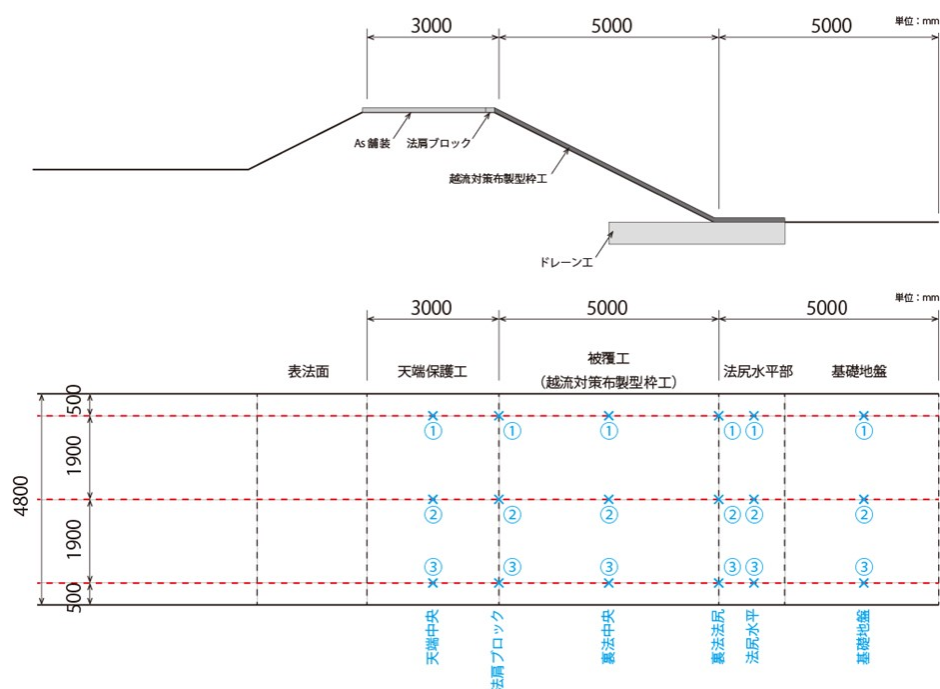


図-5 被覆工各部位のレベル測定位置

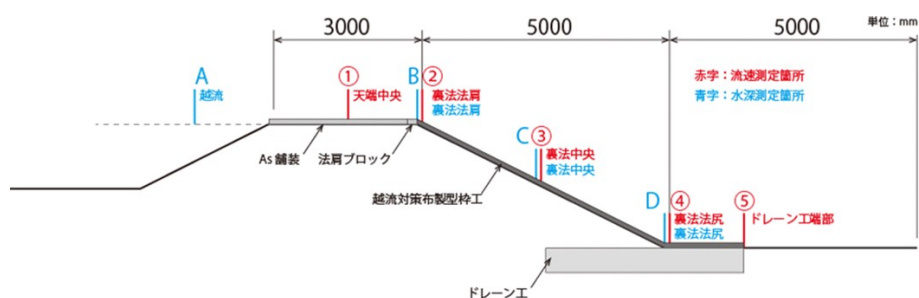


図-6 流速および水深測定位置



写真-8 越流実験状況 1



写真-9 越水実験状況 2

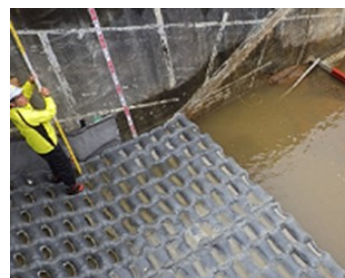


写真-10 レベル測量状況



写真-11 流速計測状況

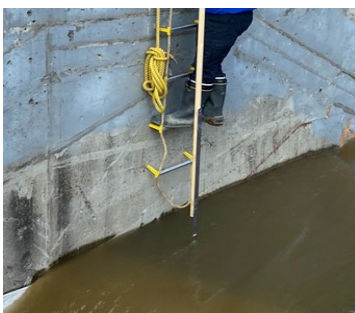


写真-12 水深計測状況



写真-13 引張破壊応力試験状況

5. 実験結果

ケース 1、2 の越水実験前、および越水 1 時間経過ごとの被覆工各部位における変位計測結果を図-7、8 に、写真-14、15 に越流実験後の状況写真を示す。越流時間 3 時間経過後も被覆工の変位はほとんどなく、堤体は被覆工によって被覆された状態が維持され、堤防天端高さが維持されている状態を確認した。ドレーン工の下流の土羽で仕上げた基礎地盤部においては、越流時間経過に伴い、洗堀が進行する過程が確認出来た。越流実験後の基礎地盤部における最大洗堀深さはケース 1 で 43.6cm、ケース 2 で 81.0cm であった。被覆工の弱部となる堤防縦断方向の突合部（写真-6）からの吸い出しは、どちらのケースでも見受けられなかった。

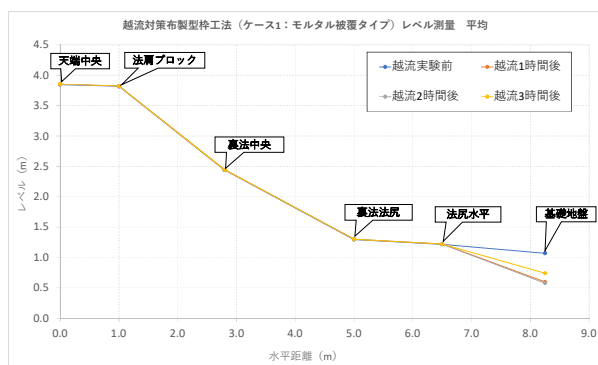


図-7 ケース 1 の被覆工レベル計測結果

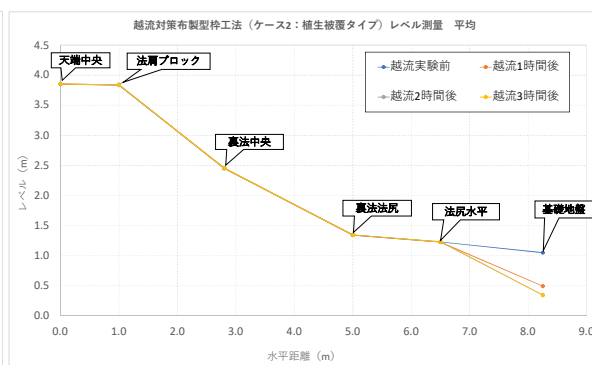


図-8 ケース 2 の被覆工レベル計測結果

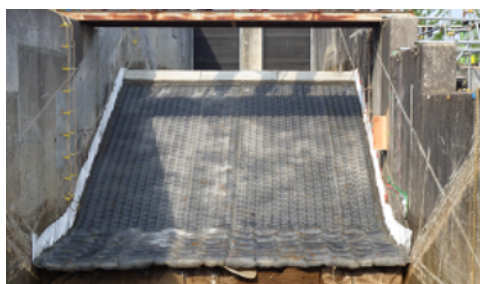


写真-14 ケース 1 越水実験後状況



写真-15 ケース 2 越水実験後状況

ケース 1、2 の越水実験中の被覆工各部位で計測した平均流速を表-2 に、平均水深を表-3 に示す。ケース 1 では天端中央部で約 1.4m/sec だった流速が、1:2.0 の法面勾配を流下することにより、法尻と基礎水平部上流側にて最大約 3.4~3.6m/sec の流速を計測した。ケース 2 では天端中央部で約 1.5m/sec だった流速が、法面中央と法尻にて最大約 3.6m/sec の流速を計測した。水深についてはケース 1、2 共に、越流 30cm から法面中央にて約 9cm まで低下した。

表-2 ケース 1、2 の平均流速

No	計測位置	平均流速 (m/s)	
		ケース1	ケース2
①	天端中央	1.443	1.495
②	裏法法肩	1.759	1.873
③	裏法中央	3.295	3.654
④	裏法法尻	3.463	3.618
⑤	ドレーン工端部	3.673	2.590

表-3 ケース 1、2 の平均水深

No	計測位置	平均水深 (cm)	
		ケース1	ケース2
A	越流	30.0	30.0
B	裏法法肩	17.3	16.3
C	裏法中央	9.5	9.3
D	裏法法尻	9.2	14.0

ケース 1、2 の被覆工撤去後の堤体における各測定位置での変位計測結果を図-9、10 に、堤体の侵食状況を写真-16、17 に示す。ケース 1、2 共に被覆工背面の堤体における実験前後の変位はほとんどなく、目視においても越流水による侵食や洗掘箇所は見受けられなかった。また、堤体土の引張破壊応力については、ケース 1 の越水実験前は平均 $1.85\text{kN/m}^2(18.9\text{gf/cm}^2)$ 、越水実験後は $1.56\text{kN/m}^2(15.9\text{gf/cm}^2)$ を計測し、ケース 2 の越水実験前は平均 $1.56\text{kN/m}^2(15.9\text{gf/cm}^2)$ 、越水実験後は $1.31\text{kN/m}^2(13.4\text{gf/cm}^2)$ を計測し、越水実験前後において堤体土の引張破壊応力はほとんど変化が見られなかった。

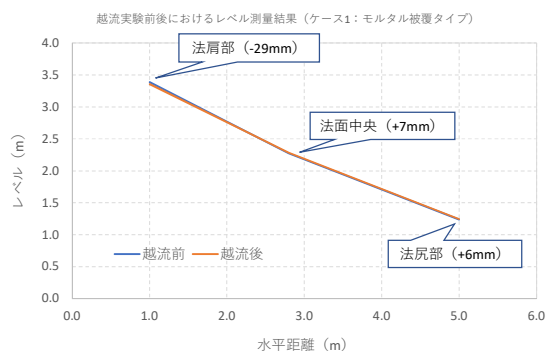


図-9 ケース 1 の堤体レベル計測結果

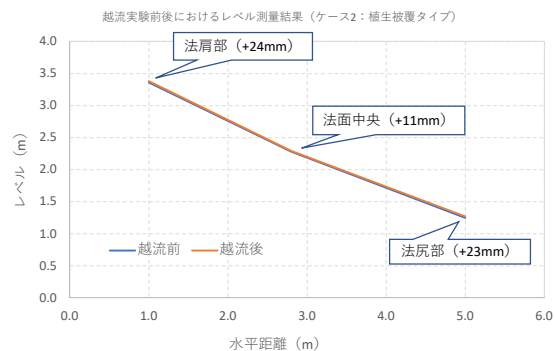


図-10 ケース 2 の堤体レベル計測結果



写真-16 ケース 1 撤去後の堤体状況



写真-17 ケース 2 撤去後の堤体状況

6. まとめ

本実験より、ケース 1、2 共に越流対策型布製型枠工法による表面被覆型の構造は、本実験条件下において被覆工の変形もなく、堤体の侵食も確認されなかった。本構造は越流水深 30cm、越流時間 3 時間という外力に対して、越水に対する性能を維持していることを確認した。

参考文献

- 国土交通省：令和元年台風 19 号の被災を踏まえた河川堤防に関する技術検討会報告書，令和 2 年 8 月。
- 国土交通省国土技術政策総合研究所，国立研究開発法人土木研究所：粘り強い河川堤防の構造検討に係る技術資料（案）Ver1.1，令和 5 年 3 月。